کامپوزیتهای پلیمری تقویتشده با عناصر سنگین برای محافظت از پر تو گاما و نو ترون: یک مطالعه شبیه سازی محمدرضا علی پور^۱، مهدی عشقی^۲ ۱- دانشجوی دکترا، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران ۲- استادیار، گروه فیزیک، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران ۱- mohamadrezaalipoor1997@gmail.com 2- eshgi54@gmail.com; meshghi@ihu.ac.ir

چکیده: محافظهای کامپوزیت پلیمری بدون سرب در پرتو پرشکی برای محافظت از بیماران در برابر قرار گرفتن در معرض تشعشعات غیرضروری استفاده میشوند. از شبیه سازی مونت کارلو برای تخمین خواص محافظ پرتو گاما کامپوزیت های پلیمری تقویت شده با تنگستن، در محدوده انرژی فوتون ۱۵ کیلو الکترون ولت تا ۱۰ مگا الکترون ولت استفاده شد. ضریب تضعیف خطی و جرمی، لایه نیم مقدار، لایه یک دهم مقدار، عدد اتمی موثر و ضریب انباشت را محاسبه شد. برای اعتبار سنجی شبیه سازی، نتایج با داده های نظری حاصل از برنامه x-Ph- مقایسه شد. مشاهده شد که داده های برنامه Phy-x و ابزار شبیه سازی 40 مطابقت خوبی داشتند. برای ارزیابی تعدیل نوترون ها، سطح مقطع حذف نوترون های سریع و حرارتی کامپوزیت های پلیمری مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج مشاهده شد که نمونه 6-4 ، به دلیل افزودن تنگستن، افزایش قابل توجهی در تراکم نشان داد که منجر به بهبود حفاظت در برابر تشعشعات گاما شد. نتایج نشان داد که سطوح انرژی به طور قابل توجهی بر نفوذ پرتو گاما تأثیر می گذارد. نتایج نشان داد که همیشه افزایش تنگستن در نمونهها منجر به افزایش مقادیر سطح مقطع حذف سریع نخواهد شد. در نتیجه، باتوجه به این نتایج نمونه در برابر تشعشعات گاما شد. نتایج نشان داد که سطوح انرژی به طور قابل توجهی سریع نخواهد شد. در نتیجه، باتوجه به این نتایج نمونه دوزایش تنگستن در نمونهها منجر به افزایش مقادیر سطح مقطع حذف نوترون های سریع نخواهد شد. در نتیجه، باتوجه به این نتایج نمونه دو-4 قابلیت محافظت بهتری نسبت به نمونههای دیگر در برابر پرتو گاما و نوترون نشان داد. این نتایج نشان می دهد که ترکیب و ریز ساختار کامپوزیت پلیمری را میتوان برای بهبود خواص تضعیف تشعشعات برای کاربردهای فیزیک

كليدواژهها: پرتو گاما، نوترون، حفاظ، كامپوزيتهاى پليمرى، Geant4 ، Phy-x.

Heavy Element-Enhanced Polymer Composites for Gamma and Neutron Radiation Shielding: A Simulation Study

M.R. Alipoor¹, M. Eshghi²

Department of Physics, Imam Hossein Comprehensive University, Tehran, Iran

1- mohamadrezaalipoor1997@gmail.com 2- eshgi54@gmail.com; meshghi@ihu.ac.ir

Abstract: Lead-free polymer composite shields are used in radiotherapy to protect patients from unnecessary radiation exposure. Monte Carlo simulation was used to estimate the gamma ray shielding properties of tungsten-doped polymer composites in the photon energy range of 15 keV to 10 MeV. The linear and mass attenuation coefficients, half-value layer, tenth-value layer, effective atomic number, and stacking coefficient were calculated. To validate the simulation, the results were compared with theoretical data obtained from the Phy-x program. It was observed that the Phy-X program data and the Geant4 simulation tool were in good agreement. To evaluate the neutron modulation, the fast and thermal neutron removal cross sections of the polymer composites were investigated. According to the results, it was observed that sample P-6 showed a significant increase in density due to the addition of tungsten, which led to improved protection against gamma radiation. The results showed that energy levels significantly affect gamma ray penetration. The results showed that increasing tungsten in the samples does not always lead to an increase in the fast

neutron removal cross section values. Consequently, according to these results, sample P-3 showed better protection against gamma and neutron radiation than the other samples. These results indicate that the composition and microstructure of the polymer composite can be optimized to improve radiation attenuation properties for medical physics applications.

Keywords: Gamma-ray, Neutron, Shielding, Polymer-Composites, Phy-x, Geant4.

وجود یادمانهای موثر در برابر تشعشعات یونیزان، استفاده ایمن از منابع تشعشع را در سراسر زمینههای پزشکی و صنعت تسهیل کرده است. در این راستا، افزایش کارایی محافظت از تشعشع از زمان شناسایی پرتوهای یونیزان، یک حوزه تحقیقاتی بزرگ باقیمانده است [۱، ۲]. اخیرا، کاربرد پرتوهای ایکس و گاما در حوزه پزشکی با افزایش روزافزون کاربردها و فناوریهای جدید در اقدامات تشخیصی و درمانی مشخص شده است. باتوجه به ویژگیهای بیولوژیکی بافتهای هدف، قرار گرفتن در معرض دوزهای بالایی از پرتوهای ایکس یا گاما ممکن است منجر به پیامدهای بیولوژیکی بلندمدت یا کوتاهمدت از جمله جهشهای ژنتیکی، سرطان و نارسایی اندامها در انسان شود [۳، ۴]. از این رو، حفاظت کافی در برابر فوتونهای یونیزه کننده یک نگرانی حیاتی است. مراکزی که از تشعشعات یونیزان استفاده می کنند، موظف به اجرای محافظ پرتویی هستند که با استانداردهای قانونی و ایمنی مطابقت دارد. موادی که معمولا برای حفاظت در برابر تشعشع به کار می روند از مواد سفت و سخت با چگالی بالا مانند سرب، آهن و اشکال مختلف بتن تشکیل شدهاند [۷-۵]. با این وجود، این مواد دارای معایب متعددی از جمله سمیت شدید، وزن قابل توجه و پایداری مکانیکی و شیمیایی ناکافی هستند. در نتیجه، محققان معاصر انواع نوآورانهای از مکانیسمهای حفاظت در برابر تشعشع را بهطور خاص برای فوتونهای کم انرژی طراحی کردهاند. کامپوزیتهای پلیمری که پرکنندههای فلزی با عدد اتمی بالا را در هر دو شکل ریزذره(ذرات در اندازه میکرومتر) و نانوذره ترکیب میکنند، بهدلیل انعطافپذیری، سازگاری ساختاری، غیرسمی بودن، ماهیت سبک وزن و مقرون به صرفه بودن، به عنوان مواد محافظ پر تویی جایگزین به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته اند [۱۱-۸]. کامپوزیت های پلیمری، که از یک ماتریس پلیمری در کنار ماده دیگری که بهعنوان تقویت کننده یا پرکننده عمل می کند، تشکیل شده بودند، کارایی بالقوهای را نشان دادهاند [۱۳،۱۲]. ریز ذرات و نانوذرات که با نسبت سطح به حجم بر تر شان متمایز می شوند، تأثیر قابل توجهی بر پیکربندی های مولکولی پلیمرها دارند. علاوه بر این، ترکیب پرکنندهها این پتانسیل را دارد که مساحت سطح را گسترش دهد و نرخ برهمکنش بین تابش گاما و ماده را افزایش دهد، در نتیجه جذب فوتونها را تسهیل می کند. [۱۴-۱۴]. تحقیقات علمی متعددی بر روی کاربرد مواد یلیمری تقویتشده به منظور محافظت در برابر تشعشع متمرکز شدهاند. عبید و همکارانش [۱۷] تجزیه و تحلیل دقیقی از کامپوزیت های پلی اتیلن با چگالی بالا تقویتشده با اندازه ذرات مختلف و کسرهای وزنی اکسید تنگستن (WO₃) انجام دادند و نشان دادند که ابعاد و کسر جرمی WO3 بهطور قابل توجهی بر خواص تضعیف پرتو گاما تأثیر می گذارد. ابوناهل و همکارانش [۱۸] با استفاده از یک ماتریس پلیمری ادغام شده با نانوذرات Bi₂O₃، یک ماده نانوکامپوزیت در نظر گرفته شده برای محافظت در برابر اشعه ایکس مهندسی کردند. این آرایش ظرفیت پلیمر را برای جذب تابش اشعه ایکس در نتیجه پراکندگی موثر Bi₂O₃ نانوساختار در ماتریس یلی وینیل افزایش داد. هیگینز و همکارانش [۱۹] مشخص کردند که ادغام اکسید هافنیوم (HfO₂) و نانوذرات WO3 منجر به افزایش ضرایب تضعیف جرمی یک رزین اپوکسی شده است. این ماتریسهای پلیمری، پیشرفتهایی را در خواص مکانیکی، حرارتی و شیمیایی ارائه میدهند و در نتیجه وابستگی به مواد مبتنی بر سرب را کاهش میدهند. علاوه بر این، انواع ماتریس های پلیمری برای ارزیابی حضور نانوذرات منفرد مشتق شده از فلزات مختلف در تزدیکی لبههای جذب عناصر ارزیابی شد. نتایج نشان داد که نانوذرات فلزات سنگین بهدلیل اعداد اتمی بالا و لبههای جذب، ویژگیهای حفاظت در برابر تشعشع رضایتبخشی دارند [۲۰، ۲۱]. با این حال، تحقیقات در مورد تأثیر کاربرد همزمان دو نانوذرات با اعداد اتمی متفاوت و لبههای جذب نزدیک به هم کافی نیست. بنابراین، پژوهش حاضر به منظور پرکردن این خلاً طراحی شده است. بهطور خاص، کارایی محافظهای کامپوزیت پلیمری شامل دو ریزذره فلزی متمایز برای طیف انرژی فوتون مربوط به کاربردهای پزشکی مورد بررسی قرار گرفت. این بعد خاص در تحقیقات قبلی بهطور کامل مورد بررسی قرار نگرفته است. استفاده از یک کامپوزیت پلیمری چند فلزی دارای پرکننده با عدد اتمی بالا (ریزذراتی که لبههای K نزدیک

به هم دارند، برای بهینهسازی میزان تضعیف در یک انرژی خاص را نشان میدهند)، در مقابل یک کامپوزیت پلیمری تک فلزی، ممکن است تضعیف تشعشعات پرانرژی را در طیف گستردهای استفاده شود. در نتیجه، مطالعه حاضر با هدف تعیین اینکه آیا کامپوزیت پلیمری چند فلزی فرموله شده با گادولینیوم (با هدف قرار دادن فوتونهای انرژی بالاتر)، تنگستن (به فوتونهای انرژی متوسط) و تلوریوم (برای فوتونهای با انرژی پایینتر) در غلظتهای مختلف و لبههای جذب بر اثربخشی تضعیف فوتونها تاثیر دارد یا خیر. پارامترهای مؤثر بر قابلیتهای محافظ تشعشع کامپوزیتهای پلیمری چند فلزی با ارزیابی تأثیر ادغام تنگستن در پلیمر با استفاده از جعبه ابزار شبیهسازی Geant4 به صورت کمی ارزیابی و ویژگیهای تضعیف فوتون آنها به طور سیستماتیک مقایسه میشوند. در نهایت، موثرترین فرمولاسیون به عنوان یک کامپوزیت پلیمری چند فلزی جدید برای کاربردهای محافظ پرتو در حوزه رادیولوژی تشخیصی پیشنهاد خواهد شد.

۲.مواد و روشها

رزین کرافتون با بور، سیلیکون و نیتروژن یک رزین فنولی پیشرفته است که با ترکیبات بور، سیلیکون و نیتروژن اصلاح شده است تا پایداری حرارتی، مقاوم در برابر شعله و خواص مکانیکی آن را افزایش دهد. ساختار مولکولی رزین کرافتون با بور، سیلیکون و نیتروژن یک پلیمر با پیوند متقابل مبتنی بر ترکیبات فنلی است که گروههای عاملی اضافی توسط بور، سیلیکون و نیتروژن معرفی شدهاند. رزین کرافتون یک شبکه سه بعدی را تشکیل میدهد که از پلهای متیلن (-CH2-، واحدهای فنلی پیوند دهنده)، استرهای بورات (-O-B-O-)، افزایش پایداری حرارتی)، پلهای سیلوکسان (-Si-O-Si-، بهبود استحکام مکانیکی) و پیوندهای آمینی (-NH افزودن -افزودن مجدد) رزین کرافتون با بور، سیلیکون و نیتروژن از کربن، هیدروژن، اکسیژن، بور، سیلیکون و نیتروژن تشکیل شده است. [77، ۳7]. نانوذرات تنگستن در هر یک از کامپوزیتهای پلیمری بهعنوان ذرات با قطر ۵۰ نانومتر مدلسازی میشوند. کامپوزیتهای پلیمری تقویتشده با عناصر سنگین که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته، با توجه به کاهش درصد مولی تلوریم و افزایش

کد نمونهها	کسر وزنی عناصر 📃 کد نمونهها									
	Н	С	0	Si	Ν	В	W	Te	Gd	(g/cm ³)
P-1	8/17	۲۱/۳۵	۱۳/۸۱	•/\\	•/94	• /۶		१٣/९९	4./21	۴/۹٩
P-2	8/17	۲۲/۳۵	13/15	•/\\	•/94	• /8	۴/۶	۱۱/۹۹	۴۰/۳۸	۵/۴۹
P-3	۶/۱۲	22/22	17/81	•/\\	•/94	• /8	۹/۲	٧/٩٩	۴۰/۳۸	۵/۹۸
P-4	۵/۰۸	14/9	۱۳/۵۵	•/•٨	•/4٣	٠/۴	۹/۲	۱۵/۹۹	۴۰/۳۸	8/44
P-5	۵/۰۸	۱۴/۹	۱۲/۹۵	•/•٨	•/۴٣	٠/۴	۱۳/۸	۱۱/۹۹	۴۰/۳۸	۶/۹۴
P-6	۵/۰۸	۱۴/۹	۱۲/۳۵	•/•٨	•/۴٣	٠/۴	۱۸/۴	٧/٩٩	۴۰/۳۸	۷/۴۴

جدول ا: کسر وزنی ترکیبات شیمیایی کامپوزیت های پلیمری.

۲-۱.جعبه ابزار شبیهسازی :

Geant4یک جعبه ابزار شی گرا برای شبیهسازی ترابرد ذرات باردار و خنثی از طریق ماده است. این ابزار مبتنی بر تکنیکهای مونتکارلو است که برای شبیهسازی برهمکنشهای پیچیده در ماده مناسب است. در این مطالعه، از جعبه ابزار Geant4 برای شبیهسازی ترابرد فوتونها در محدوده انرژی ۱۵ تا ۱۰ مگاالکترونولت استفاده کردیم. برای شبیهسازی تعدیل نوترونها نیز از نوترونهای سریع و حرارتی برای محاسبه ترابرد نوترونها استفاده شد. برای بررسی ترابرد پرتو گاما و نوترون، یک هندسه مکعبی با ابعاد ۵ سانتیمتر که در شکل ۱ نشان داده شدهاست، تغریف شد.



این هندسه برای ارزیابی تعداد اولیه (Io) و نهایی(I) فوتونها قبل و بعد از عبور از کامپوزیتهای پلیمری که بهدلیل سه برهم کنش اثر فوتوالکتریک، پراکندگی کامپتون و تولید زوج، فوتونها را تضعیف میکند را میتوان در پایان شبیهسازی محاسبه کرد. سپس از این نتایج برای تخمین ضریب تضعیف (µ) برای هر کامپوزیتهای پلیمری، طبق قانون لامبرت-بیر استفاده میشود[۲۴]:

$$\mu = \frac{1}{x} ln(\frac{I_0}{I}) \tag{1}$$

شبیهسازی با هدف اندازهگیری ضریب تضعیف خطی کامپوزیتهای پلیمری که از آن کمیتهای دیگر محافظ قابل محاسبه است، انجام میشود [۲۴]. هر نمونه مطابق با کسرهای وزنی عناصر در جدول ۱ تعریف شده است.

برای تعریف کامپوزیتهای پلیمری، نانوتقویت کنندهها (ذراتی در ابعاد ۵۰ نانومتر) به طور همگن در ماتریس پلیمری که میزبان نانوذرات است، تعریف می شود. برای شبیه سازی، به طور تصادفی ^۶۰۴ رویداد تک انرژی اصلی به عنوان پر توهای موازی پیش بینی شد. شبیه سازی مونت کارلو از این تعداد زیادی رویداد برای به حداقل رساندن خطای آماری استفاده می کند. سپس، ما باید نتایج خود را تأیید کنیم، برای این هدف، ضریب تضعیف جرمی را با استفاده از برنامه Phy-x/PSD محاسبه کردیم. Phy-x/PSD یک برنامه کاربر پسند است که می تواند ضریب تضعیف جرمی را برای هر کامپوزیت در هر انرژی مورد نیاز محاسبه کند. معمولا محققانی که یک کار آزمایشی یا شبیه سازی انجام می دهند با استفاده از این نرم افزار سعی می کنند نتایج خود را تأیید کنند. به این تر تیب، اگر انحراف بین نتایج Phy-x/PSD و دادههای شبیه سازی شده کم باشد، می توان نتایج شبیه سازی شده را تأیید کنند. به این تر تیب، اگر انحراف بین نتایج Phy-x/PSD و دادههای شبیه سازی شده کم باشد، می توان نتایج شبیه سازی شده را تأیید کرد. سازگاری نتایج شبیه سازی با استفاده از درصد انحراف برای ضریب تضعیف جرمی بین Genat4 و به مورت زیر تعریف شده است، مورد بررسی قرار گرفت [۲۵].

$$RD\% = \left| \left(\left(1 - \left(\frac{\mu_{Geant4}}{\mu_{Phy-x}} \right) \right) \times 100 \right) \right|$$

۳. نتايج و بحث

مشخصات کامپوزیتهای پلیمری شامل چگالی و کسر وزنی عناصر تشکیلدهنده این مواد در جدول ۱ نشان داده شدهاست. کامپوزیتهای پلیمری با افزودنیهای گادولونیم و تلوریم و تنگستن در درصدهای مختلف مواد افزودنی برای ارزیابی تأثیر آنها بر قابلیتهای تضعیف نوترون و گاما بررسی میشوند.

برای انجام یک ارزیابی کامل از ویژگیهای محافظ محافظ کامپوزیتهای پلیمری، محاسبه پارامترهای اساسی که تضعیف پرتو گاما را توصیف می کند، ضروری است. مرحله اولیه شامل تأیید مقادیر محاسبه شده برای اطمینان از صحت آنها است. این فرآیند اعتبار سنجی مستلزم یک تحلیل مقایسهای با استفاده از جعبه ابزار Geant4 در کنار نتایج نظری حاصل از نرم افزار Phy-x/PSD بود. نتایج ارائه شده در جدول ۲ نشان می دهد که تفاوت نسبی به طور کلی با افزایش انرژی فوتون کاهش می یابد. همانطور که در جدول ۲ نشان داده شده است، مقادیر محاسبه شده ضریب تضعیف



جرمی از نتایج نظری به دست آمده از Phy-x/PSD فراتر رفته است. این اختلاف مربوط به مدل های الکترومغناطیسی موجود در Geant4 فراتر رفته است. این اختلاف مربوط به مدل های الکترومغناطیسی موجود در Geant4 فوتون ها را با دقت بالا ترابرد می کنند و نتایجی را با حساسیت استثنایی گزارش می کند. تفاوت نسبی بین مقادیر ضریب تضعیف جرمی محاسبه شده و نتایج نظری به ویژه در بالاترین مقدار خطا، تقریبا ۲ درصد است و در نتیجه استحکام تجزیه و تحلیل مقایسهای انجام شده را نشان می دهد. شده و نتایج نظری به ویژه در بالاترین مقدار خطا، تقریبا ۲ درصد است و در نتیجه استحکام تجزیه و تحلیل مقایسهای انجام شده را نشان می دهد. وجود اکسید عناصر سنگین قابلیت تضعیف پرتو گاما و اشعهایکس را در کامپوزیتهای پلیمری افزایش می دهد. به عنوان مثال، در انرژی ۱۵ کیلو الکترونولت، مقادیر ضریب تضعیف جرمی از ۹ (cm²/g) به ۷۰ (cm²/g) افزایش می یابد. تاثیر افزودن اکسید عناصر سنگین در انرژیهای کمتر الکترونولت، مقادیر ضریب تضعیف جرمی در انرژی ۵۵ در بالاترونودن اکسید می الکترونولت، مقادیر ضریب تضعیف جرمی از ۹ (cm²/g) به ۷۰ (cm²/g) افزایش می دهد. مقادیر ضریب تضعیف جرمی در انرژی های و سنگین را کاهش می یابد. تاثیر افزودن اکسید عناصر سنگین در انرژیهای کمتر الکترونولت، مقادیر ضریب تضعیف جرمی از افزودن اکسید عناصر سنگین در انرژیهای کمتر بیشتر است، اما افزایش انرژی فوتونها، تاثیر افزودن اکسید عناصر سنگین را کاهش می دهد. مقادیر ضریب تضعیف جرمی در انرژیهای بالاتر بیشتر است، اما افزایش انرژی فوتونها، تاثیر افزودن اکسید عناصر سنگین را کاهش می دهد. مقادیر ضریب تضعیف جرمی در انرژیهای بالاتر بی بیشتر است، اما افزایش انرژی فوتونها، تاثیر افزودن اکسید عناصر سنگین را کاهش می دهد. مقادیر ضریب تضعیف جرمی در انرژیهای بالاتر بی بیکسان هستند.

جدول ۲: مقادیر محاسبه شده ضریب تضعیف جرمی با انرژی فوتون برای کامپوزیتهای پلیمری.																		
()		P-1			P-2			P-3			P-4			P-5	5		P-6	
Energy (MeV	Geant4	Phy-x	RD%	Geant4	Phy-x	RD%	Geant4	Phy-x	RD%	Geant4	Phy-x	RD%	Geant4	Phy-x	RD%	Geant4	Phy-x	RD%
•/•1۵	49/1448	49/•744	•/14	54/4821	54/4295	•/•۶	۵۷/۷۷۹۹	۵۷/۷۷۶۱	۰/۰۱	۶١/٧٨۴٨	۶١/٧۵۴٧	۰٬۰۵	88/1·TV	88/1818	•/•۴	۷۰/۴۲۰۶	۷۰/۵۰۰۰	٠/١١
•/•٣	22/9266	22/262	٠/١١	۲۵/۰۱۲۶	24/9749	٠/١١	۲۷/۱۰۰۸	77/.994	۰/۱۳	۲۸/۹۳۵۱	۲۸/۹۰۷۴	•/1•	۳۱/۰۲۳۳	۳۰/۹۸۸۹	٠/١١	۳۳/۱۱۱۶	۳۳/۰۸۰۷	٠/٠٩
•/•٣	٧/٧٧٣٧	Y/۸۱۹۶	٠/۵٩	٨/۵٠٩۶	٨/۵۵٠۵	٠/۴٨	9/2404	٩/٢٧٨۶	۰/۳۶	٩/٨٣٩٧	٩/٨٨٨٢	•/۴٩	۱۰/۵۷۵۵	1./8188	۰/۳۸	11/7114	11/8429	۰/۳۳
•/•۴	۶/۳۵۸۰	۶/۳۹۷۱	•/۶۱	8/•218	۶/•۶۲۸	•/۶٨	۵/۶۸۵۲	۵/۷۲۶۱	•/٧٢	۷/۳۱۵۵	٧/٣۶٠١	٠/۶١	۶/۹۷۹۱	۷/۰۲۳۵	•/۶٣	8/8421	۶/۶۹۰۰	۰/۷۱
•/•۵	۳/۵۰۴۴	۳/۵۰۸۸	•/17	٣/٣۶٣۶	٣/۴۰۴۰	١/١٩	٣/١٢٨٣	۳/۱۲۱۸	۰/۲۱	۴/۰۲۷۷	F/+11A	•/۴•	۳/۸۳۹۶	37/9378	۲/۳۶	۳/۶۵۱۵	٣/۶۴٩۶	۰/۰۵
•/•٨	۳/۰۰۱۱	۳/۰۰۱۰	•/• ١	8/2298	٣/١٩٠١	۱/۲۴	۳/۴۵۸۲	37/4901	•/٢	۳/۷۰۴۶	۳/۷۱۱۲	٠/١٨	٣/٩٣٣١	٣/٩٣٩٢	٠/١۵	4/1814	4/1892	٠/١٨
•/1	1/4•22	1/4144	۰/۸۳	۱/۸۳۴۵	1/8294	•/•۵	1/9809	1/9800	•1•7	۲/• ۹۶۲	۲/+ ۹۶۱	٠/•١	۲/۲۲۷۵	7/7777	۰/۰۱	۲/۳۵۸۹	۲/۳۶۰۲	•/•۶
•/1۵	•/8441	•/8488	۰/۳۳	۰ <i>/</i> ۶۹۰۱	•/۶۸۵۹	•/۶۲	۰/۷۳۶۱	٠/٧٣١٩	· /۵λ	•/٧٧۶١	•/٧٧١٧	٠/۵۷	•/8221	٠/٨١٧٧	•/۵۵	۰/ ۸۶ ۸۱	•/እ۶۵۲	۰/۳۳
•/٢	٠/٣۴٨۵	•/٣۴٩٨	۰/۳۸	۰/۳۷۰ ۱	•/٣٧•٣	•/•۵	٠/٣٩١٨	•/٣٩٢•	•/•۴	•/۴•۸۳	٠/۴٠٨٣	٠/•١	•/4٣••	•/4٣••	۰/۰۱	•/4018	•/۴۵۳۱	•/٣٢
•/٣	٠/١٧٧٩	•/١٧٧۴	۰/۳۳	•/١٨۵۵	۰/۱۸۵۶	•/•۵	•/1981	•/١٩٣١	•/•٢	•/1989	•/۱۹۶۹	•/•٢	۰/۲۰۴۵	•/٢•۴۴	•/•٣	•/7171	•/7188	٠/۵۵
•/۴	•/1794	•/١٢۶٨	•/٣۴	٠/١٣	•/1298	-/51	•/١٣٣٧	•/١٣٣۴	•/٢١	•/1844	•/١٣۴١	•/٢•	٠/١٣٨٠	•/١٣٧٧	۰/۲۱	•/1414	•/1420	۰/۵۹
•/۵11	•/١•١•	•/\•\\	•/•۴	•/١•٣•	•/1•40	1/177	•/1•&•	•/\•۶۶	۱/۴۵	•/1•۴۶	•/1•۶۲	1/57	•/1•۶۶	۰/۱۰۸۳	۱/۵۸	۰/۱۰۸۶	•/111۴	۲/۵۶
•/888	•/•٨٣٣	۰/۰۸۳۵	۰/۲۱	•/•88	•/• ٨٧۵	1/88	•/•٨۵۴	۰/•۸۵۳	•/•Y	•/•**	۰/۰۸۵۱	٠/٨١	•/•A۵۵	•/•**	١/١٣	•/• ٨۶۵	۰/۰ <i>۸۶</i> ۱	•/۴۶
•/٨	•/•٧٣۴	٠/٠٧٣٩	۰/۶۸	•/•٧۴١	•/•٧٣۵	•/٨٣	•/•٧۴٨	•/•٧۴٢	۰/۸۳	•/•٧٣۶	•/•٧٣•	٠/٨۴	•/•٧۴٣	•/•٧٣٧	٠/٨۴	•/•Y۵•	•/•Y&Y	•/٣•
۱/۵	•/•۵•۲	•/•۵	•/٣٢	۰/۰۵۰۹	•/•۵•٧	•/۵۴	•/•۵۱۱	۰/۰۵۰۸	۰/۵۴	۰/۰۵۰۱	•/•۴٩٨	۰/۵۹	•/•۵•٣	•/•۵	۰/۵۹	•/•۵•۵	•/• Δ • λ	•/۶۵
٢	•/• ***	•/• ** \$	•/Y•	./. ***	•/•۴۳۸	١/٣۵	•/•**۶	•/• **\$	•/•٢	•/•۴۳٨	• • • • • • •	•/٢۶	•/•**•	•/•۴۳۹	٠/٢۵	•/• 447	•/• ۴۴۶	۰/۹۶
٣	•/•٣٨•	•/•٣٧٧	•/ .	•/• ٣٨٢	•/•٣٧٧	١/۴٧	•/•٣٨۴	•/•٣٨۶	•/۴۴	•/• ٣٨ ١	•/• ٣٨٢	٠/٢١	•/•٣٨٣	•/•٣٨۴	۰/۲۱	•/• ٣٨۶	•/• ٣٩ ١	1/87
۴	•/•۳۵۳	۰/۰۳۵۱	•198	۰/۰۳۵۵	•/•۳۵•	١/۴٧	۰/۰۳۵۸	۰/۰۳۵۷	٠/٢٧	•.• ۳۵۹	•/•٣۶•	•/٢۶	•/•٣۶٢	•/•٣۶٣	•/٢۶	•/•٣۶۵	•/• ٣۶٩	۱/۲۵
۵	•/•٣۴•	•/•٣٣٨	•/87	•/•٣۴٣	•/•٣٣٨	۱/۴۶	•/•٣۴٧	•/•٣۴٢	١/٣٣	۰/۰۳۵۱	۰/۰۳۵۱	٠/١٧	•/•۳۵۴	•/•۳۵۴	٠/١۴	•/•۳۵٧	•/•٣۶١	۲/۰۴
۶	•/•٣٣۴	•/•٣٣٢	•/۶٨	•/•٣٣٨	•/•٣٣٧	•/۲۴	•/•٣۴٢	•/•٣۴٢	۰/۰۵	•/•٣۴٩	•/•٣۴٩	•/• ١	•/•۳۵۲	•/•۳۵۲	•/•٢	•/•۳۵۶	•/•۳۵۹	٠/٧٩
٨	•/•٣٣٣	•/•٣٣•	•/Y•	•/•٣٣٧	•/•٣۴٢	١/۴٩	•/•٣۴٢	•/•٣۴٨	۱/۶۰	•/•۳۵۳	•/•۳۵۲	•/١٢	۰/۰۳۵۸	·/•۳۵٧	٠/١٨	•/•٣۶٢	•/•٣۶۴	۰/۵۱
۱۰	•/•٣٣٧	۰/۰۳۳۵	• /۵۳	•/•٣۴٢	•/•٣۴۶	1/10	•/•٣۴٨	•/•٣۴٧	۰/۲۱	•/• 87	•/•٣۶٢	•/•٢	•/•٣۶٧	•/•٣۶٧	•/•٨	•/•٣٧٢	•/•٣٧۴	۰/۵۳

ضریب تضعیف جرمی در شکل ۲ برای تمامی نمونههای کامپوزیتهای پلیمری رسم شدهاست. این شکل نشان میدهد که برهمکنشهای مختلف در محدودههای انرژی متمایز غالب هستند. بدیهی است که طیف سه گانه انرژی فوتون وجود دارد: ناحیه انرژی اول (کمتر از ۱۵۰ کیلو الکترونولت)، ناحیه انرژی دوم (انرژیهای بین ۱۵۰ تا ۵۰۰۰ کیلو الکترونولت) و ناحیه انرژی سوم (انرژیهای بیش از ۵ مگا الکترونولت). در

ناحیه اول انرژی، نتایج ضریب تضعیف جرمی کامپوزیتهای پلیمری انتخابی کاهش سریعی را با افزایش انرژی فوتون نشان میدهند. در این انرژیها ضریب تضعیف متناسب با E⁻³ و Z⁵ کاهش مییابد. در انرژیهای پایین، فوتونها به راحتی توسط الکترونهای لایههای داخلی اتم جذب می شوند. انرژی فوتون باید بیشتر از انرژی پیوندی الکترون باشد تا اثر فوتوالکتریک رخ دهد. با افزایش انرژی فوتون، احتمال جذب کاهش می یابد، زيرا فوتونها به جاى جذب، بيشتر از ماده عبور ميكنند. در ناحيه ۴۰ كيلو الكترونولت قلههايي بسيار واضح است كه نشان دهنده لبه جذب حاصل از برهمکنش فوتوالکتریک عنصر تلوریم است. همچنین، قله دیگری در ۶۰ کیلو الکترونولت مشاهده می شود که نشان دهنده لبه جذب حاصل از برهمکنش فوتوالکتریک عنصر گادولونیم است. همانطور که انرژی فوتون از ۱۰۰ کیلو الکترونولت به ۱ مگا الکترونولت افزایش می یابد، سرعت كاهش ضريب تضعيف جرمي بهطور قابل توجهي كند مي شود. اين پديده از اين واقعيت ناشي مي شود كه ضريب تضعيف جرمي يك رابطه معکوس با انرژی در محدوده پراکندگی کامپتون نشان میدهد. در این محدوده انرژی، فوتون ها بخشی از انرژی خود را به الکترون ها منتقل میکنند و پراکنده می شوند. با افزایش انرژی فوتون، احتمال پراکندگی کاهش می یابد، زیرا فوتون ها تمایل بیشتری به عبور از ماده دارند. در انرژی های بالا، فوتونها ميتوانند به يک جفت الكترون-پوزيترون تبديل شوند. اين فرآيند تنها زماني رخ مي دهد كه انرژي فوتون بيشتر از ١/٠٢٢ مگا الكترون ولت (انرژی معادل جرم سکون الکترون و پوزیترون) باشد. در این انرژیها ضریب تضعیف با افزایش انرژی به آرامی افزایش مییابد. سطح مقطع تولید زوج با مربع عدد اتمی متناسب است و افزایش در ضریب تضعیف برای عناصر با عدد اتمی بالاتر مشهودتر است. برای موادی که قابلیتهای حفاظتی برتر در برابر فوتونهای گاما را نشان میدهند، ضروری است که ضریب تضعیف جرمی مقدار بالاتری را داشته باشد. شکل۲ نشان میدهد که ضریب تضعیف جرمی هم تحت تاثیر انرژی فوتون و هم ترکیب شیمیایی کامپوزیتهای پلیمری است. علاوه بر این، این شکل نشان میدهد که مقادیر ضریب تضعیف جرمی کاملا در یک راستا قرار دارند که به ترکیب شیمیایی مشابه و ویژگیهای ساختاری کامپوزیتهای پلیمری ارزیابی شده نسبت داده می شود. علاوه براین، از شکل ۲ مشخص شده است که مقادیر ضریب تضعیف جرمی با افزایش تقویت کننده تنگستن در ترکیب در محدوده انرژی کمتر از ۱۰۰ کیلو الکترونولت افزایش مییابد، در حالی که مقادیر ضریب تضعیف جرمی تحت تأثیر ترکیب شیمیایی در محدوده انرژی بالاتر از ۱۰۰ کیلو الکترونولت قرار نمی گیرد و از نظر انرژی، مقادیر محاسبه شده، آن نیز در همین محدوده است.



.شكل ۲: تغييرات مقادير ضريب تضعيف جرمي كامپوزيتهاي پليمري برحسب انرژي فوتونها

کمیت اساسی دیگر توصیفکننده تضعیف پرتو گاما که لازم است محاسبه شود، ضریب تضعیف خطی(LAC) میباشد. ضریب تضعیف خطی کامپوزیتهای پلیمری یکی از رایجترین پارامترها در این زمینه است زیرا تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند انرژی فوتون، ترکیب شیمیایی نمونه و چگالی آن قرار میگیرد. در کامپوزیتهای پلیمری نمونههایی با مقادیر ضریب تضعیف خطی بالا برای استفاده آزمایشی ترجیح داده میشوند، زیرا

ضریب تضعیف خطی بالاتر نشاندهنده ویژگیهای برتر در برابر تشعشع است. ضریب تضعیف خطی برای کامپوزیتهای پلیمری را میتوان از طريق استفاده از اكسيدهاي فلزات سنگين (به عنوان مثال Gd2O3،WC و TeO2 در اين مطالعه) افزايش داد. شكل ٢، ضريب تضعيف خطى را براي کامپوزیتهای پلیمری انتخاب شده در سطوح انرژی مشخص نشان میدهد. نتایج نشان میدهد که ضریب تضعیف خطی بهطور قابل توجهی برای همه کامپوزیتهای پلیمری تغییر میکند. در انرژیهای پایینتر، نمونه 6-P در مقایسه با نمونهها1-P، 2-P، 4، P-3 و 5-P دارای مقادیر ضریب تضعيف خطي بالاتري است. با افزايش انرژي، ضريب تضعيف خطي براي همه نمونههاي انتخاب شده بهطور كلي كاهش مي يابد. اين رفتار را مي توان به برهم كنش بين فوتون هاي گاما و اتم هاي اين نمونه ها نسبت داد. در محدوده انرژي پايين ٧/١ تا ٧/٢ مگا الكترون ولت، براي همه نمونه ها کاهش نسبتا شدیدی را در ضریب تضعیف خطی نشان میدهندکه حاکی از کاهش بارزتر در عملکرد محافظ در سطوح انرژی بالاتر است. در محدوده انرژی ۱٫۷ تا ۱ مگا الکترونولت، به نظر میرسد که کاهش مقادیر ضریب تضعیف خطی کند می شود، که نشان دهنده کاهش محافظ پیشروندهتر است. برای انرژی بیشتر از ۱ مگا الکترونولت، سرعت کاهش ضریب تضعیف خطی بیشتر تثبیت میشود، که نشان میدهد عملکرد محافظ کامپوزیتهای پلیمری در سطوح انرژی بالا سازگارتر میشود. همچنین مشاهده میشود که ضریب تضعیف خطی تابعی از چگالی کامپوزیتهای پلیمری است. نمونه P-6 دارای بالاترین ضریب تضعیف خطی است، در حالی که کمترین ضریب تضعیف خطی برای نمونه P-1 مشاهده شد، با تفاوت مشاهده شده نسبت به مقادیر مختلف اکسید عناصر سنگین در کامپوزیتهای پلیمری نمونه P-6 که حاوی محتوای بیشتری از اکسید عناصر سنگین در مقایسه با نمونه P-1 است، دارای مقادیر ضریب تضعیف خطی بالاتری در تمام انرژیهای انتخاب شده است. این نشان دهنده نقش عناصر سنگین در عملکرد محافظ کامپوزیتهای پلیمری است، جایی که افزایش درصد عناصر سنگین منجر به بهبود قابلیت محافظت از تشعشع گاما می شود. نسبت ضریب تضعیف خطی بین نمونه ها با بیشترین و کمترین محتوای عناصر سنگین محاسبه می شود. این روند را مي توان با توجه به برهمكنش فوتون و ماده درك كرد. در ناحيه كم انرژي، اثر فوتوالكتريك قابل توجه است. سطح مقطع اين برهمكنش وابستكي زیادی به عدد اتمی ماده دارد. از آنجایی که عناصر سنگین عدد اتمی بالایی دارند، تاثیر موثری بر ضریب تضعیف خطی در سطوح کم انرژی بیشتر مشهود است زیرا سطح مقطع برهمکنش فوتوالکتریک متناسب با Z⁵ است. اما، در انرژی بین ۰/۱ تا ۱ مگا الکترونولت، نسبت ضریب تضعیف خطي كاهش مي يابد، اين به دليل غلبه پراكندگي كامپتون است كه وابستگي يك به يك با عدد اتمي مواد محافظ دارد [٢۶].



شکل۳: تغییرات ضریب تضعیف خطی کامپوزیتهای پلیمری برحسب انرژی فوتونها.

مقادیر لایه نیم مقدار برای کامپوزیتهای پلیمری محاسبه شد که نتایج در شکل ۴ نشان داده شدهاست. این مقادیر لایه نیم مقدار میزان ضخامت محافظ و عملکرد تضعیف نمونهها را نشان میدهد. یک ماده باید ضخامت لایه نیم مقدار پایینی را داشته باشد تا بهطور موثر بهعنوان یک محافظ پیشنهاد شود. در شکل ۴، سطوح مختلف انرژی برای بررسی تاثیر افزودن تنگستن بر ضخامت لایه نیم مقدار مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۴ نشان میدهد که همبستگی بین افزایش درصد تنگستن و ضخامت لایه نیم مقدار نسبت معکوس دارد. ضخامت لایه نیم مقدار با افزودن تدریجی تنگستن به کامپوزیت پلیمری کاهش می یابد. در نتیجه، ممکن است توصیه شود که از یک ماده ضخیم تر برای جلوگیری از تشعشعات پرانرژی استفاده شود. مشخص شد که وقتی انرژی از ۰/۱ به ۱ مگا الکترونولت افزایش می یابد، مقادیر لایه نیم مقدار مربوط به کامپوزیتهای پلیمری نیز افزایش می یابد. این افزایش در ضامت لایه نیم مقدار بین مقدار نسبت معکوس دارد. ضخامت لایه نیم مقدار با افزودن تدریجی می شود. به عنوان مثال، با در نظر گرفتن لایه نیم مقدار برای نمونه 6-P در چهار سطح انرژی ۱/۵۹، ۱/۶۶۲ ، ۱/۱۷۳ و ۱/۳۳۳ مگا الکترونولت، لایه نیم مقدار به ترتیب ۱/۰۱، ۱/۱۰، ۱/۱۷ و ۱/۷۳ سانتی متر است. این روند نشان می دهد که فوتونهای با انرژی بالا نیاز به نمونه ضخیم تری برای محافظت دارند. از نظر عددی، در انرژی ۱/۵۱۱ مگا الکترونولت ، نمونه 6-P به سطحی با ضخامت ۸۸۵ سانتی متر نیاز دارد تا شدت فوتونها را تا ۵۰ درصد کاهش دهد، در حالی که نمونه 1-P در همان انرژی به سطحی با ضخامت ۱/۳۷ سانتی متر نیاز دارد تا شدت فوتونها را تا تغییر چگالی کامپوزیتهای پلیمری (با تغییر مقدار عناصر سنگین) می تواند منجر به تفاوتهایی ضخامت محافظ شود.



شكل؛ تغييرات مقادير لايه نيم مقدار كامپوزيتهاى پليمرى برحسب انرژى فوتونها.

مقادیر لایه یکدهم مقدار برای این کامپوزیتهای پلیمری در شکل ۵ ترسیم شده است. مهم است که توجه داشته باشید که لایه یکدهم مقدار ضخامت محیط لازم برای کاهش شدت فوتونها به یکدهم شدت اولیه آن است. از شکل۵ مشاهده میشود که با افزایش انرژی، لایه یکدهم مقدار برای کامپوزیتهای پلیمری نیز افزایش مییابد. بنابراین، این الگو منطقی است، زیرا فوتونهای انرژی بالاتر ظرفیت بیشتری برای نفوذ دارند. بنابراین، فوتونهای با انرژی بالاتر ممکن است قبل از اینکه شدت آنها به میزان قابل توجهی کاهش یابد، بدون تضعیف قابل توجهی عبور کنند. هنگامی که مقادیر لایه یکدهم مقدار برای شش نمونه در یک انرژی خاص مقایسه میشود، تأثیر چگالی بر روی محافظ تشعشع را میتوان به راحتی مشاهده کرد، به طوری که کامپوزیت پلیمری با چگالی پایینتر مقادیر لایه یکدهم مقدار بالاتری را نشان میدهد، و بالعکس. برای مثال، در مورد نمونه های 6–9 و 1-۹، مقادیر لایه یکدهم مقدار در انرژی ۱۵۱۱/۰ مگا الکترونولت ۲۸۸۵ و ۲۶/۶ سانتیمتر است. بابراین، در یک انرژی خاص، نمونه با چگالی بالاتر (یعنی 6–9) ادرای لایه یکدهم مقدار نازکتری در مقایسه با نمونه با چگالی کمتر است. بابراین، در یک انرژی چگالی نمونه متراکمتر است که به دلیل افزایش تعداد اتمهای موجود برای برهمکنش، در تضعیف فوتونهای کارآمدتر است.



شکل۵: تغییرات مقادیر لایه یکدهم مقدار کامپوزیتهای پلیمری برحسب انرژی فوتونها.

کمیت بعدی که در تضعیف پرتو گاما مورد بررسی قرار می گیرند، عدد اتمی مؤثر و چگالی الکترون موثر میباشد، همانطور که مشخص است که هر دو به یکدیگر مرتبط هستند. در شکل ۶ و ۷ نتایج بهدست آمده برای نمونهها ارائه شده است. موادی که با عدد اتمی موثر بالاتر مشخص میشوند، معمولا با تعداد افزوده شده از اجزای اتمی مرتبط هستند، که در نتیجه احتمال برهمکنش بین فوتونها و ترکیب عناصر را افزایش میدهد و در نتیجه منجر به افزایش تضعیف فوتون میشود. از سوی دیگر، برای کامپوزیتهای پلیمری، تأثیر افزایش درصد تنگستن بر عملکرد محافظ را میتوان با محاسبه عدد اتمی موثر تعیین کرد که در شکل ۵ نشان داده شدهاست. قابل توجه است که مقادیر عدد اتمی مؤثر برای همه نمونهها در سطوح انرژی فوتون پایین تر، بهویژه در بازه زمانی ۵۰/۱۰ تا ۲/۰ مگا الکترونولت، نسبتا بیشتر است و متعاقبا کاهش سریعی تا آستانه انرژی ۱ مگا الکترونولت نشان میدهد و به دنبال آن افزایش شدیدی مشاهده میشود که در ۱۰۰ کیلو الکترونولت مشاهده میشود. هنگامی که انرژی فوتونها افزایش میابد، برهمکنش آنها به لایههای اتمی عمیق تری در نمونهها گسترش میابد. این برهم کنشها منجر به افزایش عدد انرژی موتونها افزایش مییابد، برهمکنش آنها به لایههای اتمی عمیق تری در نمونهها گسترش میابد. این برهم کنشها منجر به افزایش عدد انرژی موتونها افزایش مییابد، برهمکنش آنها به لایههای اتمی عمیق تری در نمونهها گسترش مییابد. این برهم کنشها منجر به افزایش عدد



شکل۶: تغییرات مقادیر عدد اتمی موثر کامپوزیتهای پلیمری برحسب انرژی فوتونها

شکل ۷ تغییرات در چگالی الکترونی موثر، در سراسر طیف انرژی ۱۰ ۱۰ ما الکترونولت برای همه نمونهها را نشان میدهد. در این بررسی، الگوی مشاهدهشده در مقادیر چگالی الکترونی موثر در هر سطح انرژی فوتون تعیینشده با پارامترهای عدد اتمی مؤثر در تمام نمونهها ارتباط نزدیکی دارد و میتوان آن را به روشی مشابه با تجزیه و تحلیل عدد اتمی مؤثر، با در نظر گرفتن تأثیر برهمکنشهای مربوطه جذب فوتوالکتریک، کامپتون و تولید زوج در سطوح انرژی پایینتر، متوسط و بالاتر توضیح داد. با این وجود، تاکید بر این امر ضروری است که برخلاف رفتاری که عدد اتمی مؤثر نشان میدهد، اختلاف در مقادیر چگالی الکترونی موثردر بین همه نمونهها رفتار قابل توجهی را با افزایش انرژی فوتون نشان میدهد. بهطور کلی، یک مقدار چگالی الکترونی موثر بالا نشان دهنده افزایش در برهمکنش بین فوتونها، الکترونها و همچنین افزایش احتمال انتقال انرژی در ماده است. این مورد به وضوح در رفتار متفاوت کامپوزیت پلیمری P-4 تا 6-P میتوان مشاهده کرد.



[.] شکل ۷: تغییرات مقادیر چگالی الکترونی موثر کامپوزیتهای پلیمری برحسب انرژی فوتونها

تاکید بر این امر ضروری است که کامپوزیتهای پلیمری برای تضعیف تشعشع با هندسه پرتو باریک متمایز نمیشوند و محدوده انتشار پرتو گاما گسترده هستند و به قانون بیر-لامبرت پایبند نیست. در این چارچوب، یک پارامتر اصلاحی به نام ضریب انباشت وارد میشود. ضریب انباشت در طيف انرژی از ۱۵ ۰/۰ تا ۱۰ مگا الکترونولت تا عمق نفوذ ۴۰ مسافت آزاد ميانگين برای کامپوزيت های پليمری بهدقت محاسبه شده است. به طور معمول، مقادیر کاهش یافته ضریب انباشت برای یک ماده با احتمال کاهش نفوذ پرتو گاما از طریق آن مرتبط است. شکل ۷، مقادیر محاسبه شده ضریب انباشت را در عمق نفوذ ۱ الی ۴۰ مسافت آزاد میانگین را به ترتیب برای همه کامپوزیتهای پلیمری نشان میدهد. در بازه انرژی از ۱۵ ۰/۰ تا ۰/۱ مگا الکترونولت، ضریب انباشت مقادیر حداقلی را با نوسانات خیلی کم نشان میدهند، علیرغم افزایشهای ناگهانی در انرژی فوتون بین ۰/۰۱۵ تا ۰/۱ مگا الکترونولت، که می توان آن را حاصل از لبه های جذب L و K نسبت داد. برای کامپوزیت های پلیمری که در شکل ۸ نشان داده شدهاست، واضح است که قله تنگستن ناپدید شدهاست و یک قله داریم که ناشی از همپوشانی قله جذب تنگستن و گادولونیم است. این قله با افزایش محتوای تنگستن در نمونههای افزایش مییابد. ضریب انباشت، در انرژی از ۰/۱ الی ۵ مگا الکترون ولت افزایش مییابد. این افزایش به غلبه برهمکنش کامپتون که به کاهش انرژی چندگانه فوتون با کمترین پراکندگی مربوط است. در نتیجه، با طولانی شدن عمر فوتون، احتمال فرار آن از طريق نمونه بهطور قابل توجهي افزايش مييابد. به طور معمول، برهمكنش كامپتون در طيف انرژي ۲۵۰ كيلو الكترونولت تا ۱ مكا الكترونولت غالب است. علاوه براین، با افزایش انرژی از ۲ تا ۱۰ مگا الکترونولت، ضریب انباشت بهدلیل تأثیر برهمکنش تولید زوج در این سطوح انرژی پر تو گاما افزایش یافتهاند. در این انرژیها فوتون دارای آستانه انرژی ۱٬۰۲۲ مگا الکترونولت برای ایجاد یک جفت الکترون-پوزیترون است.. در انرژیهای بالا و به تبع آن در اعماق نفوذ بیشتر، فوتونهای ثانویه ناشی از نابودی پوزیترونها و الکترونها (که به تولید دو پرتو گاما با انرژی ۰/۵۱۱ مگا الکترونولت منجر می شود) و در نتیجه منجر به تجمع قابل توجهی از ذرات می شوند. دو فوتون پرتو گاما حاصل می توانند از طریق برهمکنشهای پراکندگی کامپتون یا اثر فوتوالکتریک از نمونه فرار کنند یا با نمونه برهمکنش کنند. هنگامی که تمام کمیتهای محافظ گاما با هم ارزیابی می شوند، کامیوزیت پلیمری P-6 در مقایسه با P-1 عملکرد بهتری در کاهش فوتونها نشان داد.



.شکل۸: تغییرات ضریب انباشت با مسافت آزاد میانگین برای کامپوزیتهای پلیمری برحسب انرژی فوتونها علاوه براین، برای بررسی عملکرد کامپوزیتهای پلیمری قابلیت آنها برای کندسازی نوترونها نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. شکل ۹ مقادیر سطح مقطع حذف نوترونهای سریع را برای کامپوزیتهای پلیمری نشان میدهد. با توجه به نتایج نمونه کامپوزیت پلیمری که بهعنوان 1-P کدگذاری شده است، بالاترین سطح مقطع حذف نوترون را نشان میدهد. در نمونه 1-P، احتمالا تراکم بالاتر اتمهای هیدروژن در ماتریس پلیمری، دلیل عملکرد بهتر در کندسازی نوترونهاست. افزایش درصد تنگستن (بهویژه در نمونههای مانند 6-P) اگرچه محافظت در برابر پرتو گاما را بهبود

میبخشد، اما لزوما منجر به افزایش کارایی در جذب نوترونهای سریع نمیشود. این پدیده ممکن است ناشی از کاهش نسبت عناصر سبک (مانند هیدروژن یا کربن در ماتریس پلیمری) باشد که نقش کلیدی در کندسازی نوترونها از طریق برخوردهای کشسان دارند.



شکل۹: سطح مقطع حذف نوترونهای سریع برای کامپوزیتهای پلیمری

جدول ۳ سطح مقطع پراکندگی کشسان، سطح مقطع پراکندگی غیرکشسان، سطح مقطع جذب نوترون و سطح مقطع کل کامپوزیتهای پلیمری برای تضعیف نوترون حرارتی را نشان میدهد. برای نوترونهای حرارتی، سطح مقطع جذب نوترون عدد خیلی پایینی را نشان میدهد که گویا این مورد است که جذب نوترون توسط کامپوزیتهای پلیمری احتمال پایینی را دارد. دربین کامپوزیتهای پلیمری 3-9 دارای بالاترین سطح مقطع کل برای نوترونهای حرارتی میباشد و بیشترین سهم را در سطح مقطع کل سطح مقطع پراکندگی غیرکشسان دارد که بهدلیل برخوردهای

کد نیمندها	سطح مقطع برهمکنشهای نوترونهای خرارتی(mm²/g)										
ك شونه ها	کشسان	غيركشسان	جذب نوترون	سطح مقطع کل							
P-1	47/141	٠/١٨۶٩	•/• ۲۵۳۶	47/724							
P-2	۴۳/۱۸۶	٠/١٩٠٢	•/• ۲۵۳۶	47/401							
P-3	ft//tw	٠/١٩٣۴	•/• ۲۵۳۶	42/449							
P-4	۳۰/۵۷۴	٠/١٩۵٢	٠/٠ ١٦٩	3.4.14							
P-5	5-1819	•/1984	٠/٠ ١٦٩	۳۰/۸۳۴							
P-6	W. /88W	•/٢•١٧	٠/٠ ١٦٩١	۳۰/λλ۲							

جدول ۳: مقادیر محاسبه شده سطح مقطع برهمکنشهای نوترونهای حرارتی برای کامپوزیتهای پلیمری.

برای ارزیابی میزان تضعیف نوترونهای حرارتی، نمونههای منتخب در ابزار شبیه سازی Geant4 با ضخامت نمونه ۲ تا ۲۰ میلیمتر مدلسازی شدند. نتایج نشان میدهد که به ترتیب قابلیت محافظت از نوترون بهصورت4-9<-1-9<-2>-9<-3<-2<-2< ترتبهبندی شدهاست. نوترونهای عبوری از کامپوزیتهای پلیمری منتخب بیشتر برای انرژیهای نوترونی حرارتی مناسب میباشند، درحالی که عملکرد مناسبی در حذف نوترونهای سریع نیز دارند. این رتبهبندی نشان میدهد که تنها چگالی بالا (مانند 6-P) عامل تعیینکننده نیست، بلکه ترکیب شیمیایی و حضور عناصر جاذب نوترون (مانند بور یا هیدروژن در ماتریس پلیمری) نقش حیاتی دارد. برای ارزیابی اثر تعدیل نوترون های حرارتی میشود در حالی که افزایش انرژیهای نوترونی حرارتی میدان شدند. نتایج نشان داد که افزایش ضخامت محافظ باعث کاهش نوترون های حرارتی میشود در حالی که افزایش انرژی نوترون باعث افزایش ذرات باقیمانده خواهد شد. کامپوزیتهای مورد مطالعه (بهویژه 3-P و 2-9) نهتنها در جذب نوترونهای حرارتی میشود در حالی که افزایش انرژی نوترون باعث افزایش ذرات باقیمانده خواهد شد. کامپوزیتهای مورد مطالعه (به یژه 3-P و 2-9) نهتنها در جذب نوترونهای حرارتی میشود در حالی که افزایش بودند، بلکه قابلیت تعدیل نوترونهای سریع را نیز داشتند. این ویژگی برای کاربردهای عملی مانند راکتورهای هسته یا دستگاههای رادیوتراپی که با تابش مختلط (سریع + حرارتی) سروکار دارند، بسیار ارزشمند است.



۴. نتیجهگیری

این کار قابلیتهای محافظ پرتو گاما و نوترون کامپوزیتهای پلیمری تقویتشده با نانوذرات فلزی تنگستن را گزارش کرد. ارزیابیهای نظری برای ویژگیهای تضعیف پرتو گاما محافظهای منتخب در طیف وسیعی از انرژیهای فوتون از ۱۵ کیلو الکترونولت تا ۱۰ مگا الکترونولت با کمک ابزار شبیهسازیGeant4، کد Phy-tx انجام شد. به ترتیب، سازگاری قابل توجهی بین نتایج به دست آمده با استفاده از تکنیکهای مختلف گزارش شد. خواص تضعیف نوترون کامپوزیتهای پلیمری نیز با ارائه سطح مقطع حذف نوترون سریع و تغییرات نرخ جذب نوترون حرارتی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که کامپوزیت پلیمری تقویت شده، افزایش قابل توجهی در ضرایب تضعیف خطی و جرمی پرتو گاما در انرژیهای زیر تشان داد. برای محافظت همزمان داد. همچنین افزایش مداوم لایه نیمه مقدار کامپوزیتهای پلیمری تقویت شده را با افزایش انرژی پرتو گاما نشان داد. برای محافظت همزمان در برابر گاما و نوترون، نمونهی 3-9 میتوانند به عنوان جایگزینهای بدون سرب برای کاربردهای پزشکی مانند محافظهای رادیولوژی یا اتاقهای TET استفاده شوند. این مطالعه نشان می دهد که کامپوزیتهای پلیمری تقویت شده با تنگستن پزشکی مانند برای کاربردهای محافظ پرتو دارند، اما نیاز به تحقیقات بیشتر در حوزههای تجربی و ترکیبات پیشرفته وجود دارد. بهینه سازی همزمان ساختار و برای کاربردهای محافظ پرتو دارند، اما نیاز به تحقیقات بیشتر در حوزههای تجربی و ترکیبات پیشرفته وجود دارد. بهینه سازی همزمان ساختار و برای کاربردهای محافظ پرتو دارند، اما نیاز به تحقیقات بیشتر در حوزههای تجربی و ترکیبات پیشرفته وجود دارد. بهینه سازی همزمان ساختار و

تعارض منافع: هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

مراجع

- 1. L. G. Yamamoto, "Risks and Management of Radiation Exposure," Pediatric *Emergency Care*, vol. 29, no. 9, pp. 1016–1026, 2013. doi: https://doi.org/10.1097/pec.0b013e3182a380b8.
- H. Li, L. Yan, J. Zhou, Y. Wang, X. Liao, and B. Shi, "Flexible and wearable functional materials for ionizing radiation Protection: A perspective review," *Chemical Engineering Journal*, vol. 487, p. 150583, 2024. doi: https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.150583.
- S. Mohan and V. Chopra, "Biological effects of radiation," Elsevier eBooks, pp. 485–508. 2022, doi: https://doi.org/10.1016/b978-0-323-85471-9.00006-3.
- T. C. Alonso, A. P. Mourão, P. C. Santana, and Silva, "Assessment of breast absorbed doses during thoracic computed tomography scan to evaluate the effectiveness of bismuth shielding," *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 117, pp. 55–57, 2016. doi: https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2016.03.018.
- E. Şakar, Ö. F. Özpolat, B. Alım, M. I. Sayyed, and Murat Kurudirek, "Phy-X / PSD: Development of a user-friendly online software for calculation of parameters relevant to radiation shielding and dosimetry," *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 166, pp. 108496–108496, 2019. doi: https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2019.108496.

- A. M. El-Khatib, T. I. Shalaby, A. Antar, and M. Elsafi, "Improving Gamma Ray Shielding Behaviors of Polypropylene Using PbO Nanoparticles: An Experimental Study," *Materials*, vol. 15, no. 11, pp. 3908–3908, 2022. doi: https://doi.org/10.3390/ma15113908.
- E. Burgio, P. Piscitelli, and L. Migliore, "Ionizing Radiation and Human Health: Reviewing Models of Exposure and Mechanisms of Cellular Damage. An Epigenetic Perspective," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 15, no. 9, pp. 1971–1971, 2018. doi: https://doi.org/10.3390/ijerph15091971.
- S. Aldawood, N. N. Asemi, H. Kassim, A. A. Aziz, W. S. Saeed, and A. Al-Odayni, "Gamma radiation shielding by titanium alloy reinforced by polymeric composite materials," *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, vol. 17, no. 1, pp. 100793–100793, 2023. doi: https://doi.org/10.1016/j.jrras.2023.100793.
- M. S. Mansy, M. M. Ghobashy, and M. I. Aly, "Enhancing gamma and neutron radiation shielding efficiency of LDPE/PVC polymers using cobalt, aluminum, and magnesium oxide fillers," *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 222, pp. 111862–111862, 2024. doi: https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2024.111862.
- H. O. Tekin, M. I. Sayyed, and S. A. M. Issa, "Gamma radiation shielding properties of the hematite-serpentine concrete blended with WO₃ and Bi₂O₃ micro and nano particles using MCNPX code," *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 150, pp. 95–100, 2018. doi: https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2018.05.002.
- H. Kassim, S. Aldawood, S. Prasad, N. N. Asemi, A. A. Aziz, and M. S. AlSalhi, "Advanced polymeric matrix utilizing nanostructured bismuth and tungsten oxides for gamma rays shielding," *Heliyon*, vol. 10, no. 17, p. e37289, 2024. doi: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37289.
- Y. Afkham, A. Mesbahi, A. Alemi, F. Zolfagharpour, and N. Jabbari, "Design and fabrication of a Nano-based neutron shield for fast neutrons from medical linear accelerators in radiation therapy," *Radiation Oncology*, vol. 15, no. 1, pp.4332, 2020. doi: https://doi.org/10.1186/s13014-020-01551-1.
- T. Özdemir, A. Güngör, I.K. Akbay, H. Uzun, and Y. Babucçuoglu, "Nano lead oxide and epdm composite for development of polymer-based radiation shielding material: Gamma irradiation and attenuation tests," *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 144, pp. 248–255, 2017. doi: https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2017.08.021.
- P. Makvandi et al., "Functionalization of polymers and nanomaterials for water treatment, food packaging, textile and biomedical applications: a review," *Environmental Chemistry Letters*, vol. 19, no. 1, pp. 583–611, 2020. doi: https://doi.org/10.1007/s10311-020-01089-4.
- 15. M.R. Alipoor, M. Eshghi, "Simulation and extraction Protective properties of bismuth-based heterojunction Nanocomposites for shielding against gamma rays," *Nano World* (In Persian), vol. 20, no. 14, pp. 34-26, 2024.
- C. V. More, Z. Alsayed, M. S. Badawi, A. A. Thabet, and P. P. Pawar, "Polymeric composite materials for radiation shielding: a review," *Environmental Chemistry Letters*, vol. 19, no. 3, pp. 2057–2090, 2021. doi: https://doi.org/10.1007/s10311-021-01189-9.
- 17. A. Obeid, H. E. Balaa, O. E. Samad, R. Awad, and M. S. Badawi, "Attenuation parameters of HDPE filled with different nanosize and bulk WO₃ for X-ray shielding applications," *The European Physical Journal Plus*, vol. 137, no. 11, 2022. doi: https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-022-03361-8.
- 18. B. M. Abunahel, I. S. Mustafa, and Z. Noor, "Characteristics of X-ray attenuation in nano-sized bismuth oxide/epoxy-polyvinyl alcohol (PVA) matrix composites," *Applied Physics A*, vol. 124, no. 12, 2018. doi: https://doi.org/10.1007/s00339-018-2254-5.
- M. C. Molina, N. A. Radcliffe, M. Toro-González, and J. V. Rojas, "Gamma ray attenuation of hafnium dioxide- and tungsten trioxide-epoxy resin composites," *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, vol. 322, no. 2, pp. 707–716, 2019. doi: https://doi.org/10.1007/s10967-019-06714-3.
- P. Mehnati, R. Malekzadeh, and M. Y. Sooteh, "Use of bismuth shield for protection of superficial radiosensitive organs in patients undergoing computed tomography: a literature review and meta-analysis," *Radiological Physics and Technology*, vol. 12, no. 1, pp. 6–25, 2019. doi: https://doi.org/10.1007/s12194-019-00500-2.
- E. Mansouri, Asghar Mesbahi, R. Malekzadeh, and A. Mansouri, "Shielding characteristics of nanocomposites for protection against X- and gamma rays in medical applications: effect of particle size, photon energy and nano-particle concentration," *Radiation and Environmental Biophysics*, vol. 59, no. 4, pp. 583–600, 2020. doi: https://doi.org/10.1007/s00411-020-00865-8
- 22. A. P. Mouritz and A. Gibson, Fire Properties of Polymer Composite Materials. 2006. doi: https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5356-6.
- 23. L. Pilato, Ed., Phenolic Resins: A Century of Progress. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-642-04714-5.
- 24. M. Alipoor, M. Eshghi, "Gamma-ray Shielding Capacity of Ceramics Tb and Fe Doped with Y₂Zr₂O₇," *Advanced Ceramics Progress* (In Persian), vol. 10, no. 1, pp. 1-10, 2004. doi: 10.30501/acp.2024.428521.1140
- S. Agostinelli et al., "Geant4—a simulation toolkit," Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, vol. 506, no. 3, pp. 250–303, 2003, doi: https://doi.org/10.1016/s0168-9002(03)01368-8.

26. G.F. Knoll, "Radiation Detection and Measurement," 4th ed, Wiley, 2010. doi:10.1002/9781118052295.